

Requested Patent: JP2001041706A

Title:

OPTICAL FREQUENCY DOMAIN REFLECTOMETRY DEVICE AND METHOD THEREFOR ;

Abstracted Patent: JP2001041706 ;

Publication Date: 2001-02-16 ;

Inventor(s): ISHIOKA MASATŌ ;

Applicant(s): MITSUBISHI HEAVY IND LTD ;

Application Number: JP19990212320 19990727 ;

Priority Number(s): ;

IPC Classification: G01B11/00; G01B9/02 ;

Equivalents: ;

ABSTRACT:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an optical frequency domain reflectometry device capable of expanding a measuring range without a limit to coherence characteristics of any light source, while eliminating deterioration in measuring accuracy caused by the measuring range expansion. SOLUTION: There are provided a light emitting part 61 capable of varying light wavelength at a predetermined period $1/f_m$, a light distributing part 63 for distributing light 62 outputted from the light emitting part 61 and producing first reference light 90 and measurement light 91, a reference optical part 6c for producing second reference light 69, a light wave superposing part 70 for producing interference light 74 by superposing the second reference light 69 and reflected measurement light 73 formed of the measurement light 91 reflected by a measurement target 72, and a detecting part 76 for detecting a frequency difference fb_1 between the second reference light 69 and the reflected measurement light 73 as a measurement light frequency difference fb_1 on the basis of the interference light 74 and determining a measurement quantity La related to the measurement target 72 on the basis of the detected measurement light frequency difference fb_1 . And, the reference optical part 6c allows the first reference light 90 to travel around or back and forth N (N/FONT

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号
特開2001-41706
(P2001-41706A)

(43)公開日 平成13年 2月16日 (2001.2.16)

(51)Int.Cl.
G 0 1 B 11/00

識別記号

F I
G 0 1 B 11/00

テ-マ-ト*(参考)

B 2 F 0 6 4
G 2 F 0 6 5

9/02

9/02

審査請求 未請求 請求項の数13 OL (全 21 頁)

(21)出願番号 特願平11-212320

(22)出願日 平成11年 7月27日 (1999. 7. 27)

(71)出願人 000006208

三菱重工株式会社

東京都千代田区丸の内二丁目 5 番 1 号

(72)発明者 石岡 昌人

神奈川県横浜市金沢区幸浦一丁目 8 番地 1

三菱重工株式会社基盤技術研究所内

(74)代理人 100102864

弁理士 工藤 実 (外 1 名)

Fターム(参考) 2F064 AA01 CC10 EE01 EE06 FF02

GG02 GG12 GG22 GG52 JJ15

KK01

2F065 AA02 AA06 FF52 GG06 LL02

LL04 LL12 QQ00 QQ44 UU07

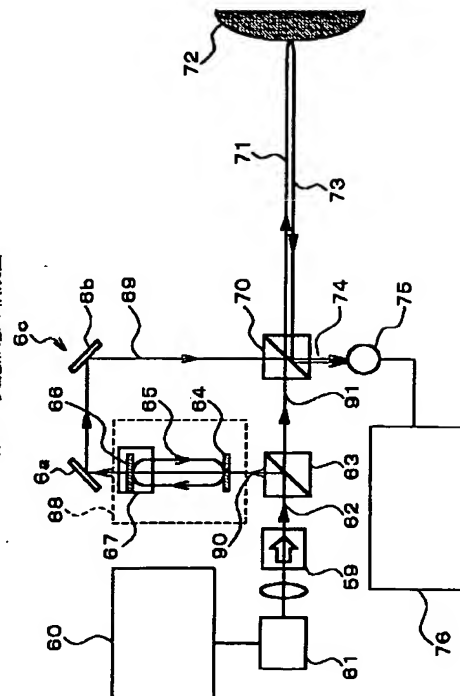
(54)【発明の名称】 光周波数領域反射測定装置および光周波数領域反射測定方法

(57)【要約】

【課題】 任意の光源特有のコヒーレンスに制限されることなく測定範囲の拡大ができ、測定範囲の拡大に伴う測定精度の劣化を解消可能な光周波数領域反射測定装置を提供する。

【解決手段】 所要の周期 $1/f_m$ で光の波長を可変にできる発光部 61 と、前記発光部から出力された光 62 を分配して第1参照光 90 および測定光 91 を生成する光分配部 63 と、前記第1参照光に基づいて、第2参照光 69 を生成する参照光学部 6c と、前記測定光が測定対象 72 に反射してなる測定反射光 73 と、前記第2参照光とを合波して干渉光 74 を生成する光合波部 70 と、前記干渉光に基づいて、前記測定反射光と前記第2参照光の周波数差 f_{b1} を、測定光周波数差 f_{b1} として検出し、前記検出された測定光周波数差に基づいて、前記測定対象に関する測定量 L_a を求める検出部 76 とを備え、前記参照光学部は、前記第1参照光が、可変に設定可能な距離 L_r 、 $L_r + \Delta L_r$ を N ($N \geq 2$) 回往復または周回した結果としての光を、前記第2参照光として生成可能である。

第1の実施形態の構成図



【特許請求の範囲】

【請求項1】 所要の周期で光の波長を可変にできる発光部と、

前記発光部から出力された光を分配して第1参照光および測定光を生成する光分配部と、

前記第1参照光に基づいて、第2参照光を生成する参照光学部と、

前記測定光が測定対象に反射してなる測定反射光と、前記第2参照光とを合波して干渉光を生成する光合波部と、

前記干渉光に基づいて、前記測定反射光と前記第2参照光の周波数差を、測定光周波数差として検出し、前記検出された測定光周波数差に基づいて、前記測定対象に関する測定量を求める検出部とを備え、

前記参照光学部は、前記第1参照光が、可変に設定可能な距離を N ($N \geq 2$) 回往復または周回した結果としての光を、前記第2参照光として生成可能である光周波数領域反射測定装置。

【請求項2】 請求項1記載の光周波数領域反射測定装置において、

前記検出部は、

前記測定対象に関する測定量を、粗の部分と、微の部分とを足し合わせて求め、

前記微的部分を、第1の前記距離に対応する前記測定光周波数差を示す第1データに基づいて算出し、

前記粗的部分を、第2から第5のデータに基づいて算出し、

前記第2データは前記第1の距離を示し、

前記第3データは前記第1の距離に対応する前記測定光周波数差と前記第1の距離とは異なる第2の前記距離に対応する前記測定光周波数差の変化した量を示し、

前記第4データは前記変化の方向を示し、

前記第5データは第1距離に係る参照光周波数差と第2距離に係る参照光周波数差の変化量を示し、

前記第1距離に係る参照光周波数差は、前記第1参照光が前記第1の距離を k ($k \geq 0$) 回往復または周回した結果としての k に係る前記第2参照光と、前記第1参照光が前記第1の距離を前記 $k+1$ 回往復または周回した結果としての $k+1$ に係る前記第2参照光の周波数差であり、

前記第2距離に係る参照光周波数差は、前記第1参照光が前記第2の距離を前記 k 回往復または周回した結果としての k に係る前記第2参照光と、前記第1参照光が前記第2の距離を前記 $k+1$ 回往復または周回した結果としての $k+1$ に係る前記第2参照光の周波数差である光周波数領域反射測定装置。

【請求項3】 所要の周期で光の波長を可変にできる発光部と、

前記発光部から出力された出力光に基づいて、入力光を生成する入力光生成部と、

前記入力光を分配して参照光および測定光を生成する光分配部と、

前記測定光が測定対象に反射してなる測定反射光と、前記参照光とを合波して干渉光を生成する光合波部と、

前記干渉光に基づいて、前記測定反射光と前記参照光の周波数差を、測定光周波数差として検出し、前記検出された測定光周波数差に基づいて、前記測定対象に関する測定量を求める検出部とを備え、

前記入力光生成部は、前記出力光が、可変に設定可能な距離を N ($N \geq 2$) 回往復または周回した結果としての光を、前記入力光として生成可能である光周波数領域反射測定装置。

【請求項4】 設定された周期でその周波数が変化する光を出力する発光部と、

前記発光部から出力された光を分配して第1参照光および測定光を生成する第1ビームスプリッタと、

前記第1参照光に基づいて、第2参照光を生成する参照光学部と、

前記測定光が測定対象に反射してなる測定反射光と、第2参照光とを重ね合わせて干渉光を生成する第2ビームスプリッタと、

前記干渉光に基づいて、前記測定反射光と前記第2参照光の周波数差を検出し、前記周波数差に基づいて、前記測定対象に関する測定量を求める検出部とを備え、

前記参照光学部は、第1および第2の反射鏡と、前記第1および第2の反射鏡の間である反射鏡間隔を可変にする間隔可変部を有し、

前記第1の反射鏡は、前記第1参照光を透過入力し、

前記第1および第2の反射鏡のそれぞれは、互いに協働して前記第1参照光を前記第1および第2の反射鏡の間で複数回反射させて、前記反射鏡間隔を複数回周回または往復する周回光を生成し、

前記第2の反射鏡は、前記周回光が前記反射鏡間隔を1回周回または往復する毎に、前記周回光を一部透過させてなる前記第2参照光を出力する光周波数領域反射測定装置。

【請求項5】 設定された周期でその周波数が変化する光を出力する発光部と、

前記発光部から出力された光を分配して第1参照光および測定光を生成する第1光ファイバケーブルと、

前記第1参照光に基づいて、第2参照光を生成する参照光学部と、

前記測定光が測定対象に反射してなる測定反射光と、第2参照光とを重ね合わせて干渉光を生成する第2光ファイバケーブルと、

前記干渉光に基づいて、前記測定反射光と前記第2参照光の周波数差を検出し、前記周波数差に基づいて、前記測定対象に関する測定量を求める検出部とを備え、

前記参照光学部は、

第1および第2の入力ポートおよび第1および第2の出

力ポートを有する第3光ファイバケーブルと、
 入力部および出力部を有し、前記入力部が前記第3光ファイバケーブルの前記第2の出力ポートに接続され、前記出力部が前記第3光ファイバケーブルの前記第2の出力ポートに接続される光ファイバと、
 前記光ファイバにおける前記入出力部の途中に設けられ前記入出力部間の光路長を可変にする光路可変部とを有し、
 前記光ファイバは、前記入出力部間を複数回周回する周回光を生成し、
 前記第3光ファイバケーブルは、
 前記第1の入力ポートから入力した前記第1参照光を分岐させて第1および第2の分岐光を生成し、前記第1の分岐光を前記第1の出力ポートから前記第2参照光として出力し、前記第2の分岐光を前記第2の出力ポートから前記光ファイバに第 n ($n \geq 1$) 回目の前記周回光として出力し、
 前記第2の入力ポートから入力した前記第 n 回目の周回光を分岐させて第3および第4の分岐光を生成し、前記第3の分岐光を前記第1の出力ポートから前記第2参照光として出力し、前記第4の分岐光を前記第2の出力ポートから前記光ファイバに第 $n+1$ 回目の前記周回光として出力し、
 前記第2の入力ポートから前記第 $n+1$ 回目の前記周回光を前記第 n 回目の周回光として入力する光周波数領域反射測定装置。
 【請求項6】 請求項4または5に記載の光周波数領域反射測定装置において、
 更に、
 前記周回光の強度を増幅する光増幅器を有している光周波数領域反射測定装置。
 【請求項7】 設定された周期でその周波数が変化する光を出力する発光部と、
 前記発光部から出力された光を分配して第1参照光および測定光を生成する第1ビームスプリッタと、
 前記第1参照光に基づいて、第2参照光を生成する参照光学部と、
 前記測定光が測定対象に反射してなる測定反射光と、第2参照光とを重ね合わせて干渉光を生成する第2ビームスプリッタと、
 前記干渉光に基づいて、前記測定反射光と前記第2参照光の周波数差を検出し、前記周波数差に基づいて、前記測定対象に関する測定量を求める検出部とを備え、
 前記参照光学部は、
 第1および第2の反射膜面と、
 前記第1および第2の反射膜面の間に設けられた複屈折光ファイバと、
 前記第1の反射膜面の前段および前記第2の反射膜面の後段に設けられ、前記複屈折光ファイバに入出力する光の偏光方向を決定する第1および第2の偏光部と、

前記第1および第2の偏光部を回転させて、前記第1および第2の偏光部により決定される前記偏光方向を変化させる回転部とを有し、
 前記第1の反射膜面は、前記第1の偏光部を介して前記第1参照光を透過入力し、
 前記第1および第2の反射膜面のそれぞれは、互いに協働して前記第1参照光を前記第1および第2の反射膜面の間を複数回反射させて、前記第1および第2の反射膜面の間を複数回周回または往復する周回光を生成し、
 前記第2の反射膜面は、前記周回光が前記第1および第2の反射膜面の間を1回周回または往復する毎に、前記周回光を一部透過させ、前記第2の偏光部を通過してなる前記第2参照光を出力する光周波数領域反射測定装置。

【請求項8】 (a) 設定された時間間隔でその周波数が変化する光を、入力光として提供する事と、(b) 基端点から第1の中間点を介して終端点までの、その光路長が既知である第1の光路を提供する事と、(c) 前記基端点から第2の中間点を介して前記終端点までの第2の光路を提供する事と、(d) 前記入力光を前記基端点から前記第1の光路に出力し、前記終端点における前記第1の光路に出力された前記入力光を、参照光として提供する事と、(e) 前記入力光を前記基端点から前記第2の光路に出力し、前記終端点における前記第2の光路に出力された前記入力光を、測定光として提供する事と、(f) 前記第1および第2の光路の光路差に対応する、前記参照光および前記測定光の周波数差を、ビート周波数として検出する事と、(g) 前記ビート周波数に基づいて、前記第2の中間点に関する測定量を求める事と、(h) 前記第1の光路の前記光路長を可変にする事とを備えてなり、
 前記(f)は、前記光路長が可変にされた前記第1の光路と前記第2の光路の光路差に対応する前記参照光および前記測定光の周波数差を、前記ビート周波数として検出する光周波数領域反射測定方法。

【請求項9】 請求項8記載の光周波数領域反射測定方法において、

前記(h)は、その前記光路長が互いに異なる前記第1の光路を複数生成する事を含み、

前記(f)は、前記複数の第1の光路のうち、前記第2の光路の光路長と最も近い光路長を有する前記第1の光路と、前記第2の光路の光路差に対応する前記参照光および前記測定光の周波数差を前記ビート周波数として検出する光周波数領域反射測定方法。

【請求項10】 請求項9記載の光周波数領域反射測定方法において、

前記(h)は、前記複数の第1の光路を第2の設定された時間間隔で生成するとともに、前記複数の第1の光路同士の光路長差が互いに同じとなるように前記複数の第1の光路を生成する光周波数領域反射測定方法。

【請求項11】(aa) 設定された時間間隔でその周波数に変化する光を、入力光として提供する事と、(ab) 基端点から第1の中間点を介して終端点までの、その光路長が既知である第1の光路を提供する事と、

(ac) 前記基端点から第2の中間点を介して前記終端点までの第2の光路を提供する事と、(ad) 前記入力光を前記基端点から前記第1の光路に出力し、前記終端点における前記第1の光路に出力された前記入力光を、参照光として提供する事と、(ae) 前記入力光を前記基端点から前記第2の光路に出力し、前記終端点における前記第2の光路に出力された前記入力光を、測定光として提供する事と、(af) 前記第1および第2の光路の光路差に対応する、前記参照光および前記測定光の周波数差を、ビート周波数として検出する事と、

(ag) 前記ビート周波数に基づいて、前記第2の中間点に関する測定量を求める事とを備えてなり、前記第1の光路は、前記第1の光路を通る光が第3の設定された距離を2回以上周回または往復する周回部分を含んでいる光周波数領域反射測定方法。

【請求項12】(m) 設定された時間間隔でその周波数に変化する光を、入力光として提供する事と、(n)

基端点から第1の中間点を介して終端点までの、その光路長が既知である第1の光路を提供する事と、(o)

前記基端点から第2の中間点を介して前記終端点までの第2の光路を提供する事と、(p) 前記入力光を前記基端点から前記第1の光路に出力し、前記終端点における前記第1の光路に出力された前記入力光を、参照光として提供する事と、(q) 前記入力光を前記基端点から前記第2の光路に出力し、前記終端点における前記第2の光路に出力された前記入力光を、測定光として提供する事と、(r) 前記第1および第2の光路の光路差に対応する、前記参照光および前記測定光の周波数差を、ビート周波数として検出する事と、(s) 前記ビート周波数に基づいて、前記第2の中間点に関する測定量を求める事と、(t) 前記第1の光路の前記光路長を可変にする事とを備えてなり、

前記(r)は、前記光路長が可変にされた前記第1の光路と前記第2の光路の光路差に対応する前記参照光および前記測定光の周波数差を、第1の前記ビート周波数として検出し、

前記(t)は、前記第1の光路の光路長を、前記第1のビート周波数に対応する前記第1の光路の光路長とは異なる再変化量に設定し、

前記(r)は、前記光路長が前記再変化量に設定された前記第1の光路と、前記第2の光路に対応する前記参照光および前記測定光の周波数差を、第2の前記ビート周波数として検出し、

前記(s)は、前記第1および第2のビート周波数に基づいて、前記第2の中間点に関する測定量を求める光周波数領域反射測定方法。

【請求項13】 請求項12記載の光周波数領域反射測定方法において、

前記(t)は、その前記光路長が互いに異なる前記第1の光路を複数生成する事を含み、前記複数の第1の光路同士の光路長差が互いに同じとなるように前記複数の第1の光路を生成し、

前記(r)は、前記複数の第1の光路のうち、前記第2の光路の光路長と最も近い光路長を有する前記第1の光路と、前記第2の光路の光路差に対応する前記参照光および前記測定光の周波数差を前記第1のビート周波数として検出し、

前記(t)は、前記第1のビート周波数に対応する前記第1の光路の光路長と、前記再変化量との差が、前記互いに同じとされた前記複数の第1の光路同士の光路長差を超えない値となるように前記再変化量を設定する光周波数領域反射測定方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、連続的な光周波数掃引が可能な光源を利用した計測原理に基づく距離または多重位置計測(FMCW法: Frequency Modulations Continuous Wave, OFDR法: Optical Frequency Domain Reflectometry, 総称して以下、「光周波数領域反射測定法」と呼ぶ)全般に関する。

【0002】

【従来の技術】光計測分野のうち、光周波数領域反射測定法は、測距計、光ファイバセンサー、光ファイバ探傷検査装置等に応用される。この光周波数領域反射測定法は、連続的な光周波数掃引が可能な光源を利用した距離または多重位置の計測法で、具体的にはこの光源からの光波に周波数変調を行い(FM: Frequency Modulation)、そのFMの光波を計測場所から測定目標物体に向け射出し、目標物体から反射された反射光を再び受光、それを計測側の参照光との干渉により、参照光と反射光との光遅延時間(光路差、距離)に相当する周波数差、つまりビート(うなり)周波数(beat frequency)を測定する。これより所望の測定量(この場合距離であるが、それ以外に温度、圧力も可能)を求める方法である。

【0003】すなわち、この計測方法は、時間的に線形掃引が可能な光源から繰り返し出力される光FM波が干渉系によってヘテロダイン検波され、その時のビート信号の周波数情報から所望の測定量を計測する方法であり、そのビート周波数は参照光と測定目標までの光路差時間(距離)に依存して変化する特徴を持っている。なお、ここで「時間的に線形掃引する」とは、時間軸に対して一定の間隔で周波数を変化させることを意味する。

【0004】この計測方法の基本装置構成を図13に示

し、その光FMの発生からビート信号検出までの原理を図14および図15に示す。図13において、光源に半導体レーザ2を用いた例を取り上げて説明する。ただし光源は半導体レーザに限らず、波長可変可能な光源ならばそれに制約されることはない。発振器1により半導体レーザ2は周波数が時間に対して直線的に掃引された光FM波3を出力する。この出力光3の光周波数は図14(a)の波形21や22のような挙動を示す。図14(a)の $\Delta\nu$ は光変調帯域幅(光周波数掃引幅)である。この場合、鋸波を例にとったが、三角波でも同様なことがいえる。

【0005】そして光FM出力3は、ビームスプリッタ4で参照光5と物体光7(測定光)7に分配される。参照光5はビームスプリッタ4から距離 L_1 離れた参照ミラー6に反射され再び折り返される。そして、物体光7も同様に距離 L_2 だけ離れた測定対象8に反射され再び折り返される。この場合、距離の差 ΔL は $|L_1 - L_2|$ となる。この結果、それぞれの反射光5、7はビームスプリッタ4によって重ね合わせられ干渉光9となる。

【0006】このときの反射光5、7の光FM波の関係を図14(a)に示す。図14(a)は、図13の干渉光9により光FM波21と22が参照ミラー6と測定対象8との光路差の往復分 $2\Delta L$ に相当する光遅延時間 τ

$$\Delta L = (c/2\Delta\nu) \times (f_b/f_m) \quad (1)$$

ただし、 c は光速であり、 $\Delta\nu$ は光変調帯域幅(光周波数掃引幅)であり、 f_m は変調周波数である。

【0009】本発明の目的は、光周波数領域反射測定法の測定距離の範囲の拡大にある。それを妨げている課題について説明する。

【0010】「光周波数領域反射測定法」の測定距離範囲を制限している課題は二つあり、一つはその光源の可干渉性(コヒーレンス)によるビート信号の消失、もう一つは時間に対しての光周波数掃引に若干の非直線性の

$$L_{limit} = L_c/2 = c/(2\pi\Delta\nu_f) \quad (2)$$

ただし、 c は光速である。

【0012】例えば市販の安価な半導体レーザではその $\Delta\nu_f$ は100MHzであり、式(2)に代入しその測定範囲限界 L_{limit} を求めると0.48mである。そして光通信用の回折格子内蔵型のDBR、DFBタイプの半導体レーザでは $\Delta\nu_f$ が数百kHzから数MHzであり、これによる L_{limit} は約50m以上になり測定範囲の拡大が可能となる。

【0013】しかしこのような性能のよい光源を使っても結局は、光源特有のコヒーレンスによる制限を受け測定範囲が限定されてしまう。しかも、これらの説明は前者の「原理上測定可能な距離範囲」についてのみであり、その測定範囲限界 L_{limit} における測定精度(分解能)を保証するものではない。同時に測定精度を保証するには後者で説明した「光周波数掃引の非直線性」を直線に補正しなければならず、それは測定距離範

だけずれて重ね合っている関係を示している。この関係からすると変調周期 $1/f_m$ (f_m は変調周波数)のほとんど全領域にわたり周波数差 f_b が発生することがわかる。これがビート周波数である。

【0007】その f_b の時間変化を表したのが図14(b)である。この図から低周波ビート27と高周波ビート28の2種類のビート周波数が発生するが高周波側のビート周波数28は τ の時間間隔でしか発生せず、しかも τ は $1/f_m$ と比べ極めて短い時間間隔であるためそれは無視することができる。よって、ここで一般的に呼んでいるビート周波数は低周波側のビート周波数27である。

【0008】さて、図13での干渉光9は光検出器10によって二乗検波され電気信号波形となって検出される。その波形は図14(c)のビート信号強度波形として示した。その信号波形をスペクトラムアナライザまたはA/D変換器11を通して電算機等の演算装置12に取り込み、たとえばFFTといった周波数解析アルゴリズムを用いることで図15のビート周波数スペクトラム31が測定される。これより求めたビート周波数 f_b とあらかじめ既知のパラメータを用いて距離 ΔL を式(1)より算出することができる。

影響によるビート信号の消失である。前者は本原理手法そのものの限界であるのに対して、後者はその前者による限界の前に測定距離固有のビートが不明瞭となり測距精度が劣化、ついには測定不能となり測距範囲を限定している。

【0011】前者は光源特有のコヒーレンスで決定され、それは光源の線幅 $\Delta\nu_f$ (Hz)で決まるコヒーレンス長 L_c の半分(反射往復のため)が測定距離範囲の限界 L_{limit} である。その関係を式(2)に示す。

図が長く(遠く)なるほどその補正精度の要求精度が厳しくなり、結局、測定距離が長くなるほど測定精度は悪くなるのは避けられない(光周波数掃引の非直線性の補正による測距精度の向上の詳細は同発明者による特願平10-220879に記載している)。

【0014】

【発明が解決しようとする課題】本発明は上記に示すような課題に鑑み創案されたもので、任意の光源特有のコヒーレンスに制限されることなく測定範囲の拡大ができ、同時にこれまでの測定範囲の拡大にともなう測定精度の劣化を解消し、測定範囲が拡大しても測定精度が悪くならない光周波数領域反射測定装置および方法を提供することを目的としている。

【0015】

【課題を解決するための手段】その課題を解決するための手段が請求項に対応して表現される次の記載中に現れ

る() つきの数字は、請求項の記載事項が詳しく後述される実施の複数の形態のうちの少なくとも1つの形態の部材、工程、動作に対応することを示すが、本発明の解決手段がそれらの数字が示す実施の形態の部材に限定して解釈されるためのものではなく、その対応関係を明白にするためのものである。

【0016】本発明の光周波数領域反射測定装置は、所要の周期($1/f_m$)で光の波長を可変にできる発光部(61)と、前記発光部(61)から出力された光(62)を分配して第1参照光(90)および測定光(91)を生成する光分配部(63)と、前記第1参照光(90)に基づいて、第2参照光(69)を生成する参照光学部(6c)と、前記測定光(91)が測定対象(72)に反射してなる測定反射光(73)と、前記第2参照光(69)とを合波して干渉光(74)を生成する光合波部(70)と、前記干渉光(74)に基づいて、前記測定反射光(73)と前記第2参照光(69)の周波数差(f_{b1})を、測定光周波数差(f_{b1})として検出し、前記検出された測定光周波数差(f_{b1})に基づいて、前記測定対象(72)に関する測定量(L_a)を求める検出部(76)とを備え、前記参照光学部(6c)は、前記第1参照光(90)が、可変に設定可能な距離(L_r' 、 $L_r' + \Delta L_r'$)を N ($N \geq 2$)回往復または周回した結果としての光(69)を、前記第2参照光(69)として生成可能である。

【0017】上記において、 $N \geq 2$ としたのは、図13の参照光5は距離 L_1 を1回往復($N=1$)してなるものであるため、この $N=1$ を除外する意味である。

【0018】本発明の光周波数領域反射測定装置において、前記検出部(76)は、前記測定対象(72)に関する測定量(L_a)を、粗の部分($|N|L_r$)と、微の部分(l_a)とを足し合わせて求め、前記微の部分(l_a)を、第1の前記距離(L_r')に対応する前記測定光周波数差(f_{b1})を示す第1データに基づいて算出し、前記粗の部分($|N|L_r$)を、第2から第5のデータに基づいて算出し、前記第2データは前記第1の距離(L_r')を示し、前記第3データは前記第1の距離(L_r')に対応する前記測定光周波数差(f_{b1})と前記第1の距離(L_r')とは異なる第2の前記距離($L_r' + \Delta L_r'$)に対応する前記測定光周波数差(f'_{b1})の変化した量($\Delta f_{b1}'$)を示し、前記第4データは前記変化の方向を示し、前記第5データは第1距離に係る参照光周波数差(f_{br})と第2距離に係る参照光周波数差(f'_{br})の変化量を示し、前記第1距離に係る参照光周波数差(f_{br})は、前記第1参照光(90)が前記第1の距離(L_r')を k ($k \geq 0$)回往復または周回した結果としての k に係る前記第2参照光(45)と、前記第1参照光(90)が前記第1の距離(L_r')を前記 $k+1$ 回往復または周回した結果としての $k+1$ に係る前記第2参照光(4

6)の周波数差(f_{br})であり、前記第2距離に係る参照光周波数差(f'_{br})は、前記第1参照光(90)が前記第2の距離($L_r' + \Delta L_r'$)を前記 k 回往復または周回した結果としての k に係る前記第2参照光と、前記第1参照光(90)が前記第2の距離($L_r' + \Delta L_r'$)を前記 $k+1$ 回往復または周回した結果としての $k+1$ に係る前記第2参照光の周波数差(f'_{br})である。

【0019】本発明の光周波数領域反射測定装置は、所要の周期($1/f_m$)で光の波長を可変にできる発光部(61)と、前記発光部(61)から出力された出力光(62)に基づいて、入力光(62a)を生成する入力光生成部(68)と、前記入力光(62a)を分配して参照光(69)および測定光(91)を生成する光分配部(63a)と、前記測定光(91)が測定対象(72)に反射してなる測定反射光(73)と、前記参照光(69)とを合波して干渉光(74)を生成する光合波部(63a)と、前記干渉光(74)に基づいて、前記測定反射光(73)と前記参照光(69)の周波数差(f_{b1})を、測定光周波数差(f_{b1})として検出し、前記検出された測定光周波数差(f_{b1})に基づいて、前記測定対象(72)に関する測定量(L_a)を求める検出部(76)とを備え、前記入力光生成部(68)は、前記出力光(62)が、可変に設定可能な距離(L_r' 、 $L_r' + \Delta L_r'$)を N ($N \geq 2$)回往復または周回した結果としての光(62a)を、前記入力光(62a)として生成可能である。

【0020】本発明の光周波数領域反射測定装置は、設定された周期($1/f_m$)でその周波数(ν_0 、 $\nu_0 + \Delta\nu$)が変化する光(62)を出力する発光部(61)と、前記発光部(61)から出力された光を分配して第1参照光(90)および測定光(91)を生成する第1ビームスプリッタ(63)と、前記第1参照光(90)に基づいて、第2参照光(69)を生成する参照光学部(6c)と、前記測定光(91)が測定対象(72)に反射してなる測定反射光(73)と、第2参照光(69)とを重ね合わせて干渉光(74)を生成する第2ビームスプリッタ(70)と、前記干渉光(74)に基づいて、前記測定反射光(73)と前記第2参照光(69)の周波数差(f_{b1})を検出し、前記周波数差(f_{b1})に基づいて、前記測定対象(72)に関する測定量(L_a)を求める検出部(76)とを備え、前記参照光学部(6c)は、第1および第2の反射鏡(64、66)と、前記第1および第2の反射鏡(64、66)の間(L_r')である反射鏡間隔(L_r')を可変にする($L_r' + \Delta L_r'$)間隔可変部(67)を有し、前記第1の反射鏡(64)は、前記第1参照光(90)を透過入力し、前記第1および第2の反射鏡(64、66)のそれぞれは、互いに協働して前記第1参照光(90)を前記第1および第2の反射鏡(64、66)の間(L

r')で複数回反射させて、前記反射鏡間隔(L_r')を複数回周回または往復する周回光(65)を生成し、前記第2の反射鏡(66)は、前記周回光(65)が前記反射鏡間隔(L_r')を1回周回または往復する毎に、前記周回光(65)を一部透過させてなる前記第2参照光(69)を出力する。

【0021】本発明の光周波数領域反射測定装置は、設定された周期($1/f_m$)でその周波数(ν_0 、 $\nu_0 + \Delta\nu$)が変化する光(62)を出力する発光部(61)と、前記発光部(61)から出力された光を分配して第1参照光(108)および測定光(101)を生成する第1光ファイバカプラ(100)と、前記第1参照光(108)に基づいて、第2参照光(112)を生成する参照光学部(115)と、前記測定光(101)が測定対象(105)に反射してなる測定反射光(106)と、第2参照光(112)とを重ね合わせて干渉光(114)を生成する第2光ファイバカプラ(113)と、前記干渉光(114)に基づいて、前記測定反射光(106)と前記第2参照光(112)の周波数差(f_{b1})を検出し、前記周波数差(f_{b1})に基づいて、前記測定対象(105)に関する測定量(L_a)を求める検出部(76)とを備え、前記参照光学部(115)は、第1および第2の入力ポート(①、②)および第1および第2の出力ポート(③、④)を有する第3光ファイバカプラ(109)と、入力部(116a)および出力部(116b)を有し、前記入力部(116a)が前記第3光ファイバカプラ(109)の前記第2の出力ポート(④)に接続され、前記出力部(116b)が前記第3光ファイバカプラ(109)の前記第2の出力ポート(②)に接続される光ファイバ(116)と、前記光ファイバ(116)における前記入出力部(116a、116b)の途中に設けられ前記入出力部(116a、116b)間の光路長を可変にする光路可変部(111)とを有し、記光ファイバ(116)は、前記入出力部(116a、116b)間を複数回周回する周回光(110)を生成し、前記第3光ファイバカプラ(109)は、前記第1の入力ポート(①)から入力した前記第1参照光(108)を分岐させて第1および第2の分岐光を生成し、前記第1の分岐光を前記第1の出力ポート(③)から前記第2参照光(112)として出力し、前記第2の分岐光を前記第2の出力ポート(④)から前記光ファイバ(116)に第 n ($n \geq 1$)回目の前記周回光(110)として出力し、前記第2の入力ポート(②)から入力した前記第 n 回目の周回光(110)を分岐させて第3および第4の分岐光を生成し、前記第3の分岐光を前記第1の出力ポート(③)から前記第2参照光(112)として出力し、前記第4の分岐光を前記第2の出力ポート(④)から前記光ファイバ(116)に第 $n+1$ 回目の前記周回光(110)として出力し、前記第2の入力ポート(②)から前記第 $n+1$ 回目の前

記周回光(110)を前記第 n 回目の周回光(110)として入力する。

【0022】本発明の光周波数領域反射測定装置において、更に、前記周回光(65、110)の強度を増幅する光増幅器(120、123)を有している。

【0023】本発明の光周波数領域反射測定装置は、設定された周期($1/f_m$)でその周波数(ν_0 、 $\nu_0 + \Delta\nu$)が変化する光(62)を出力する発光部(61)と、前記発光部(61)から出力された光を分配して第1参照光(80)および測定光(91)を生成する第1ビームスプリッタ(63)と、前記第1参照光(80)に基づいて、第2参照光(134)を生成する参照光学部(68)と、前記測定光(91)が測定対象(72)に反射してなる測定反射光(73)と、第2参照光(134)とを重ね合わせて干渉光(74)を生成する第2ビームスプリッタ(70)と、前記干渉光(74)に基づいて、前記測定反射光(73)と前記第2参照光(134)の周波数差(f_{b1})を検出し、前記周波数差(f_{b1})に基づいて、前記測定対象(72)に関する測定量(L_a)を求める検出部(76)とを備え、前記参照光学部(68)は、第1および第2の反射膜面(82、85)と、前記第1および第2の反射膜面(82、85)の間に設けられた複屈折光ファイバ(130)と、前記第1の反射膜面(82)の前段および前記第2の反射膜面(85)の後段に設けられ、前記複屈折光ファイバ(130)に入出力する光の偏光方向を決定する第1および第2の偏光部(131、133)と、前記第1および第2の偏光部(131、133)を回転させて、前記第1および第2の偏光部(133)により決定される前記偏光方向を変化させる回転部とを有し、前記第1の反射膜面(82)は、前記第1の偏光部(131)を介して前記第1参照光(80)を透過入力し、前記第1および第2の反射膜面(82、85)のそれぞれは、互いに協働して前記第1参照光(80)を前記第1および第2の反射膜面(82、85)の間を複数回反射させて、前記第1および第2の反射膜面(82、85)の間を複数回周回または往復する周回光(132)を生成し、前記第2の反射膜面(85)は、前記周回光(132)が前記第1および第2の反射膜面(82、85)の間を1回周回または往復する毎に、前記周回光(132)を一部透過させ、前記第2の偏光部(133)を通過してなる前記第2参照光(134)を出力する。

【0024】本発明の光周波数領域反射測定方法は、(a)設定された時間間隔($1/f_m$)でその周波数(ν_0 、 $\nu_0 + \Delta\nu$)が変化する光(62)を、入力光(62)として提供する事と、(b)基端点(63)から第1の中間点(68)を介して終端点(70)までの、その光路長が既知である第1の光路(63→68→70)を提供する事と、(c)前記基端点(63)から第2の中間点(72)を介して前記終端点(70)まで

の第2の光路(63→72→70)を提供する事と、
 (d) 前記入力光(62)を前記基端点(63)から前記第1の光路(63→68→70)に出力し、前記終端点(70)における前記第1の光路(63→68→70)に出力された前記入力光(62)を、参照光(69)として提供する事と、(e) 前記入力光(62)を前記基端点(63)から前記第2の光路(63→72→70)に出力し、前記終端点(70)における前記第2の光路(63→72→70)に出力された前記入力光(62)を、測定光(73)として提供する事と、
 (f) 前記第1および第2の光路(63→68→70、63→72→70)の光路差に対応する、前記参照光(69)および前記測定光(73)の周波数差を、ビート周波数(f_{b1})として検出する事と、(g) 前記ビート周波数(f_{b1})に基づいて、前記第2の中間点(72)に関する測定量を求める事と、(h) 前記第1の光路(63→68→70)の前記光路長を可変にする事を備えてなり、前記(f)は、前記光路長が可変にされた前記第1の光路(63→68→70)と前記第2の光路(63→72→70)の光路差に対応する前記参照光(69)および前記測定光(73)の周波数差を、前記ビート周波数(f_{b1})として検出する。

【0025】前記(g)の前記第2の中間点(72)に関する測定量とは、前記基端点(63)から前記第2の中間点(72)までの距離、前記第2の中間点(72)の温度、圧力が含まれることができる。さらに、前記第2の中間点(72)において欠陥(被検査材にある欠陥のような不均一なところ)があることを測定すること(探傷)が含まれる。

【0026】前述した本発明の各構成要素のうち、図13に示した各構成要素を割当てることができるものに、その割当てを行うと以下ようになる。図13に示す技術は、(a) 設定された時間間隔($1/f_m$)でその周波数(ν_0 、 $\nu_0 + \Delta\nu$)が変化する光(3)を、入力光(3)として提供する事と、(b) 基端点(4)から第1の中間点(6)を介して終端点(4)までの第1の光路(4→6→4)を提供する事と、(c) 前記基端点(4)から第2の中間点(8)を介して前記終端点(4)までの第2の光路(4→8→4)を提供する事と、(d) 前記入力光(3)を前記基端点(4)から前記第1の光路(4→6→4)に出力し、前記終端点(4)における前記第1の光路(4→6→4)に出力された前記入力光(3)を、参照光(5)として提供する事と、(e) 前記入力光(3)を前記基端点(4)から前記第2の光路(4→8→4)に出力し、前記終端点(4)における前記第2の光路(4→8→4)に出力された前記入力光(3)を、測定光(7)として提供する事と、(f) 前記第1および第2の光路(4→6→4、4→8→4)の光路差に対応する、前記参照光(5)および前記測定光(7)の周波数差を、ビート周波数(f

b)として検出する事と、(g) 前記ビート周波数(f_b)に基づいて、前記第2の中間点(8)に関する測定量を求める事を備えた光周波数領域反射測定方法である。

【0027】本発明の光周波数領域反射測定方法において、前記(h)は、その前記光路長が互いに異なる前記第1の光路(63→68→70)を複数生成する事を含み、前記(f)は、前記複数の第1の光路(63→68→70)のうち、前記第2の光路(63→72→70)の光路長と最も近い光路長を有する前記第1の光路(63→68→70)と、前記第2の光路(63→72→70)の光路差に対応する前記参照光(69)および前記測定光(73)の周波数差を前記ビート周波数(f_{b1})として検出する。

【0028】上記本発明によれば、前記ビート周波数(f_{b1})は、前記複数の第1の光路(44、 $k=N$)のうち前記第2の光路(43)に最も近い前記第1の光路(45、 $k=2$)と、前記第2の光路(43)との光路差(τ_a)に対応するものとして検出される。このため、前記最も近い第1の光路(45、 $k=2$)との比較において、前記第2中間点(72)に関する測定量(例えば距離、特にここでは相対距離 l_a)を求めることができる。上記 $k=2$ に設定された第1の光路の距離に対する、前記第2の中間点(72)の距離のずれ(位置ずれ)を検出する場合には、前記相対距離 l_a の検出で十分であり、上記 $k=N$ の N を求めることにより求められる絶対距離(L_a)の測定までは不要である。

【0029】前記相対距離 l_a は、下記式(11)により求められる。

$$l_a = (c f_{b1} / \alpha).$$

ここで、 c は光速である。

$$\alpha = 2 \Delta \nu f_m.$$

$\Delta \nu$ は、光FM帯域幅であり、前記入力光(62)の周波数の変化分である。 f_m は、前記入力光(62)の変調周波数である。……(11)

【0030】図1において、反射鏡64、66の間隔長さを適宜調整して、任意の隣り合う参照光同士間でしか相関がないように設定しておく。このことにより、自動的に、前記第2の光路43に1番近い前記第1の光路45との光路差 τ_a に相当する前記ビート周波数41と、2番目に近い前記第1の光路46との光路差に相当する前記ビート周波数42のみが発生する。

【0031】本発明の光周波数領域反射測定方法において、前記(h)は、前記複数の第1の光路(63→68→70)を第2の設定された時間間隔(τ_r)で生成するとともに、前記複数の第1の光路(63→68→70)同士の光路長さ(L_r)が互いに同じとなるように前記複数の第1の光路(63→68→70)を生成する。

【0032】前記第2の設定された時間間隔、および前

記複数の第1の光路(63→68→70)同士の光路長差は、反射鏡64、67間の距離(L_r')に対応している。

【0033】本発明の光周波数領域反射測定方法は、
(aa) 設定された時間間隔($1/f_m$)でその周波数(ν_0 、 $\nu_0 + \Delta\nu$)が変化する光(62)を、入力光(62)として提供する事と、(ab) 基端点(63)から第1の中間点(68)を介して終端点(70)までの、その光路長が既知である第1の光路(63→68→70)を提供する事と、(ac) 前記基端点(63)から第2の中間点(72)を介して前記終端点(70)までの第2の光路(63→72→70)を提供する事と、
(ad) 前記入力光(62)を前記基端点(63)から前記第1の光路(63→68→70)に出力し、前記終端点(70)における前記第1の光路(63→68→70)に出力された前記入力光(62)を、参照光(69)として提供する事と、(ae) 前記入力光(62)を前記基端点(63)から前記第2の光路(63→72→70)に出力し、前記終端点(70)における前記第2の光路(63→72→70)に出力された前記入力光(62)を、測定光(73)として提供する事と、
(af) 前記第1および第2の光路(63→68→70、63→72→70)の光路差に対応する、前記参照光(69)および前記測定光(73)の周波数差を、ビート周波数(f_{b1})として検出する事と、(ag) 前記ビート周波数(f_{b1})に基づいて、前記第2の中間点(72)に関する測定量を求める事とを備えてなり、前記第1の光路(63→68→70)は、前記第1の光路(63→68→70)を通る光(65)が第3の設定された距離(L_r')を2回以上周回または往復する周回部分を含んでいる。

【0034】本発明の光周波数領域反射測定方法は、
(m) 設定された時間間隔($1/f_m$)でその周波数(ν_0 、 $\nu_0 + \Delta\nu$)が変化する光(62)を、入力光(62)として提供する事と、(n) 基端点(63)から第1の中間点(68)を介して終端点(70)までの、その光路長が既知である第1の光路(63→68→70)を提供する事と、(o) 前記基端点(63)から第2の中間点(72)を介して前記終端点(70)までの第2の光路(63→72→70)を提供する事と、
(p) 前記入力光(62)を前記基端点(63)から前記第1の光路(63→68→70)に出力し、前記終端点(70)における前記第1の光路(63→68→70)に出力された前記入力光(62)を、参照光(69)として提供する事と、(q) 前記入力光(62)を前記基端点(63)から前記第2の光路(63→72→70)に出力し、前記終端点(70)における前記第2の光路(63→72→70)に出力された前記入力光(62)を、測定光(73)として提供する事と、
(r) 前記第1および第2の光路(63→68→70、

63→72→70)の光路差に対応する、前記参照光(69)および前記測定光(73)の周波数差を、ビート周波数(f_{b1})として検出する事と、(s) 前記ビート周波数(f_{b1})に基づいて、前記第2の中間点(72)に関する測定量を求める事と、(t) 前記第1の光路(63→68→70)の前記光路長を可変にする事とを備えてなり、前記(r)は、前記光路長が可変にされた前記第1の光路(63→68→70)と前記第2の光路(63→72→70)の光路差に対応する前記参照光(69)および前記測定光(73)の周波数差を、第1の前記ビート周波数(f_{b1})として検出し、前記(t)は、前記第1の光路(63→68→70)の光路長($k=2$)を、前記第1のビート周波数(f_{b1})に対応する前記第1の光路(63→68→70)の光路長とは異なる再変化量($k=2'$)に設定し、前記(r)は、前記光路長が前記再変化量($k=2'$)に設定された前記第1の光路(63→68→70)と、前記第2の光路(63→72→70)に対応する前記参照光(69)および前記測定光(73)の周波数差を、第2の前記ビート周波数(f'_{b1})として検出し、前記(s)は、前記第1および第2のビート周波数(f_{b1} 、 f'_{b1})に基づいて、前記第2の中間点(72)に関する測定量を求める。

【0035】本発明の光周波数領域反射測定方法において、前記(t)は、その前記光路長が互いに異なる前記第1の光路(63→68→70)を複数生成する事を含み、前記複数の第1の光路(63→68→70)同士の光路長差が互いに同じとなるように前記複数の第1の光路(63→68→70)を生成し、前記(r)は、前記複数の第1の光路(63→68→70)のうち、前記第2の光路(63→72→70)の光路長と最も近い光路長を有する前記第1の光路(63→68→70)と、前記第2の光路(63→72→70)の光路差に対応する前記参照光(69)および前記測定光(73)の周波数差を前記第1のビート周波数(f_{b1})として検出し、前記(t)は、前記第1のビート周波数(f_{b1})に対応する前記第1の光路(63→68→70)の光路長と、前記再変化量($k=2'$)との差が、前記互いに同じとされた前記複数の第1の光路(63→68→70)同士の光路長差(L_r)を超えない値となるように前記再変化量($k=2'$)を設定する。

【0036】本発明の装置構成は、所要の周期で光の波長(周波数)可変ができる光源部(発光手段)(61)と、外部からその波長可変制御を行うために必要な制御回路および信号発生器から構成される波長可変制御部(波長可変制御手段)(60)と、外部から光源部(61)への戻り光による光周波数の不安定さを防ぐための光学素子(59)、そして光源(61)からの出力光(62)を参照光学系(第1光学手段)(68)と測定光(91)との2方向へ分配する光分配器(63)と、

その参照光学系(68)からの反射・透過光(69)と被測定対象(72)からの測定反射光(73)とを合波するための光合波器(70)からなる測定光学系(第2光学手段)と、その第2光学手段により得られる干渉信号光(74)を電気信号として検出するための光検出器(75)、それによって得られる電気信号(ビート信号)の周波数成分を解析するための検波解析処理部(76)から構成されている光周波数領域反射測定装置において、上記参照光学系(第1光学手段)(68)の光路上の構成が、ある周期長間隔(τ_r)で多重往復・周回し再び測定光学系(第2光学手段)へ帰還するようにしてあり、その多重往復・周回の基本周期の光路長(L_r)がわずかに可変、またはわずかに異なる基本周期の光路長(L_r)を選択あるいは発生させることで、その参照光路長に任意に遅延を与えることができる。

【0037】本発明の手段は、光周波数領域反射測定装置の参照光学系(第一光学手段)の基本光路長 L_r と、周回数 N と、基本光路長 L_r からの遅延変化量 ΔL_r だけ変化した時のビート周波数の変化分と、その変化分の方の情報により、最終的に測定したい測定値(L_a)の粗の部分($|N|L_r$)を求め、微の部分(1_a)は遅延変化起こす前に検出されたビート周波数値より求め、これら両者を足し合せた粗・微計測($|N|L_r \pm 1_a$)により精度を維持しつつダイナミックレンジを広くできる。

【0038】また、第1光学手段(参照光学系)(68)が光源部(61)の直後に配置しても(分配器(63)により参照光(90)と測定光(91)とに二分される前に)上記発明と同様の効果(精度を維持しつつダイナミックレンジを広くする)をもたらす。

【0039】

【発明の実施の形態】以下に添付図面を参照して、本発明による光周波数領域反射測定法の一実施形態について詳細に説明する。

【0040】(第1の実施形態)ここで図1から図8を参照して第1の実施形態および実施例を述べる。図1は本実施形態の構成を示しており、図2から図7は本実施形態の作用、図8は実施例を示している。第1の実施形態は周回参照光学系がファブリペロー型である。図1は、その部分をミラー対の空間型の例で説明しているが、その部分はファイバファブリペロー型に置き換えても同じ作用をもたらす。

【0041】第1の実施形態の作用を図1の構成を使い、図2から図7を用いて説明する。図1の光源61は光周波数変調制御部60によって光周波数変調(FM)を受け、アイソレータ59を通り光FM出力62として出力される。その出力光62はビームスプリッタ63により参照光90と測定信号光91とに分配される。その

$$f_{br} = \alpha \tau_r, \quad \alpha = 2\Delta\nu f_m, \quad \dots (3)$$

ただし、 $\Delta\nu$: 光FM帯域幅、 f_m は変調周波数である。

うち参照光90はファブリペロー型周回参照光学系68に導かれ反射鏡64と反射鏡66のそれぞれの繰り返し反射によりその反射鏡間隔 L_r を周回する周回反射光65が作り出される。

【0042】その結果、光学系68では周回反射光65が一往復するごとに反射鏡66からの一部透過光が一往復時間($\tau_r = L_r / c$, c : 光速, $L_r = 2L_r'$)ごとに規則正しく出力される。これが周回参照光69として本実施形態中の測定レンジの拡大のために寄与する。ここまでの動作についての原理を図2から図4を用いて説明する。

【0043】図2は周回参照光を用いた時の光周波数掃引時間変化である。図中の点線は各周回における参照光の光周波数掃引の様子で、実線は測定反射光43である。ビート周波数はこれらの光周波数の差の組み合わせにより幾つも発生するが、それは理論上規則性のある組み合わせで限られた範囲で発生するため、事前にあるビート周波数(もしくは周波数帯域内)だけを着目し観測することで、この場合距離を求めることができる。

【0044】その過程を図2から図4を用いて具体的に説明するが、同時に、一般的(N 周回の場合)に拡張した場合についても説明する。

【0045】周回参照光は、図2に示すように、周回時間間隔 τ_r ごとに $k=0, 1, 2, 3, \dots, N$ 周回それぞれに対応した時間 $t=0, \tau_r, 2\tau_r, 3\tau_r, \dots, N\tau_r$ のように時間多重で複数形成(点線)される。現状、この段階でも測定信号光43がなくても周回参照光同士の周波数差によりビート信号は発生する。その基本となるビート周波数は隣り合う参照光の周波数差 f_{br} であり、2つ両隣り、3つ両隣りごとに $2f_{br}$ 、 $3f_{br}$ のように、 f_{br} の高調波成分の形で離散的に発生する。

【0046】しかしながら仮に N 周回したからといって、 Nf_{br} までの全てのビート周波数の高調波成分が発生するとは限らない。それは周回参照光同士の相関度(コヒーレンス)の大小によってその高調波領域は決まる。もし相関が無限にあるならば全ての高調波成分は存在しうが、実際はその相関は有限であるため、その周回参照光同士のビート周波数の数もその相関時間の範囲でしか存在しない。

【0047】ここで任意の隣り合う周回参照光同士間でしか相関がない場合を考える(実際の動作としては図1の反射鏡64、66の間隔長さを移動ステージ67を用いて変えるだけでその相関度も自在に調整できる)。すると、周回参照光同士のビート周波数は基本参照ビート周波数 f_{br} しか存在しなくなる。この時の f_{br} は次式(3)で表される。

【0048】再び図1でのそれ以降の動作について説明すると同時に、図2から図4の原理図も併用して本実施形態を説明する。

【0049】さて今度、このような周回参照光の条件下で、図1の測定対象72 ($k=0$ に係る参照光との光路差時間 $2\tau_r + \tau_a$ に相当) から測定反射光73が反射再到来する。この測定反射光73と参照光69はビームスプリッタ70を介して合波し干渉光74として受光器75で二乗検波される。そして信号処理部76によりビート信号の周波数成分が解析される。これらの結果は、図2の原理図の關係からみると周回参照光同士の關係に新たに測定反射光43が加わることとなる。

【0050】任意の隣り合う周回参照光同士間でしか相

$$f_{br} = f_{b1} + f_{b2}. \quad (4)$$

ここで、

$$\begin{aligned} (i) \quad f_{b1} &= \alpha \tau_a. & (0 \leq f_{b1} \leq (f_{br}/2)). \\ (ii) \quad f_{b2} &= \alpha (\tau_r - \tau_a). & ((f_{br}/2) \leq f_{b2} \leq f_{br}). \end{aligned} \quad (5)$$

である。

【0053】式(5)の二つビート周波数スペクトラム f_{b1} 48と f_{b2} 49が、測定距離 L (図4参照) が変化しても(4)式を常に満たすならば、 f_{b1} に関して言えばその軌跡は図4の符号51のように周回光路長 L_r を一周期としたジグザクの折り返し軌跡を示す。そして各軌跡ごとに添付されている数字は、その測定距離領域でのビートに寄与している周回参照光の周回番号でありその±の符号は測定信号より遠いところにある参照光には+、近いところにある場合は-という意味で表記している。

【0054】つまり測定レンジの拡大(この場合測距範囲の拡大)に必要な測定基準は、参照光がN回周回すること、自動的にN倍その基準光路長が等間隔に拡大され、今回の例題である測定反射光43では、自動的にその距離に一番近い測定基準である2番目の参照光($2\tau_r$)からの光路差(τ_a)に相当するビート周波数(41)が発生する。

【0055】この段階では、ある任意の距離(この場合2番目の周回参照光の光路差 $2\tau_r$)をオフセットとした、そこからの相対距離 l_a (光路差 τ_a に対応する距離)は求められるが、この段階では周回参照光の周回数N番目(この場合 $N=2$)がわからないため、 $k=0$ を絶対基準として測定した絶対距離は、まだわからない。しかしながらその相対距離 l_a のみを知るためであるならばこの段階で十分である。

【0056】次に説明するのは、更に絶対距離をもとめるための手順である。この手順を図5から図7の「Nの判定方法」を用いて説明する。前述した相対距離を求める方法にこの方法を組み合わせることで、そのビート信号が何周回(N周回)目の参照光と干渉して得られたものなのかと(Nの絶対値の判定)、その参照光が測定信

関がない条件下で、これらの周回参照光と測定信号光43との相関関係があるのは $k=2$ に係る参照光45と $k=3$ に係る参照光46のみであり、測定信号光43とのそれぞれの周波数差(ビート周波数)は f_{b1} 41と f_{b2} 42となる。

【0051】これらビート周波数の大小関係は図3で示しているビート周波数スペクトラム48、49に相当し、同時に周回参照光同士の基本ビート周波数スペクトラム47も一緒に発生する。

【0052】これらのビート周波数スペクトラム f_{br} と f_{b1} と f_{b2} との関係は、測定反射光43の参照光からの光路差が変化しても常に次式(4)の関係を満たす特徴を有する。

号光より遠いか近いかを判定し(Nの符号の判定)、これらを組み合わせて絶対距離 $L_a = |N| L_r \pm l_a$ を求めることができる。

【0057】その「Nと符号の判定」の手順と原理を図1と図5から図7を用いて説明する。まず、Nを判定するための動作手順として、図1の周回参照光学系68のファブリペロー干渉系の片方の反射鏡66を移動ステージ67で光軸方向に可変にすることでファブリペロー干渉系の反射鏡64と反射鏡66の基本となる光路間隔長 L_r 、周回時間 τ_r をそれぞれ、 $L_r \rightarrow L_r + \Delta L_r$ 、 $\tau_r \rightarrow \tau_r + \Delta \tau_r$ のように変化させる。

【0058】この変化はN周回することにより ΔL_r 、 $\Delta \tau_r$ が累積加算(N倍)される結果、間隔を変化させる前と比べ、N周回目のその変化はそれぞれ $N \Delta L_r$ 、 $N \Delta \tau_r$ だけ変化することになる。その変化分は図7で示すように検出されるビート周波数の変化量(図7の点線と実線の周波数差)に反映される。周回光路差を変化させる前後の各光の関係を図5で示す。図5の点線が反射鏡64と66の間隔を変化させる前の状態で、一点鎖線は間隔を変化した後である。そして、実線が測定反射光である。ちなみに、測定信号光は周回光路長の変化には関係しないので図2の符号43で示すもののそのままである。

【0059】任意のN周回目参照光によるビート周波数から絶対距離 L_a を求めるためには、上記の周回参照光の基本光路長 L_r を僅かに可変にするこれらの動作が必要である。これらの情報から求められる絶対距離 L_a は次式を用いて求めることができる。

$$(i) \quad N > 0$$

$$L_a = |N| L_r - c f_{b1} / \alpha.$$

$$(ii) \quad N < 0$$

$$L_a = |N| L_r + c f_{b1} / \alpha.$$

ここで、 c は光速である。

(6)

【0060】ここで重要なのは N であり、それ以外は既知のパラメータである。 N は次のように求めることができる。前述した操作により基本光路長 L_r が L_r から $L_r + \Delta L_r$ に変化すると図6のビート周波数スペクトラム $f_{b1} 48$ (点線)が $f'_{b1} 54$ (実線)のように変化する。その変化量を $\Delta f_{b1}'$ とした時、図5の条件下($k=2, k=2'$)ではその変化量 $\Delta f_{b1}'$ は $2\Delta f_{br}$ に相当する(図7の $k=2$ 参照)。

【0061】更に重要なのは、この変化量の向きである。つまり、周回参照光の基本光路差が長くなる方向を+、短くなる方向を-と事前に定義すれば、おのずと $\Delta f_{b1}'$ はその変化量に符号が付く。これらの準備と式(7)によりその N と符号は判別でき、その結果を式

$$\begin{aligned} f_{b1} &= \alpha \tau_a, & f'_{b1} &= f_{b1} + \Delta f_{b1}', \\ \Delta f_{b1}' &= -2\alpha \Delta \tau_r. \end{aligned} \quad (8)$$

【0064】また、同様に周回参照光同士のビート周波数変化量 Δf_{br} は、以下のようになる。

$$\Delta f_{br} = \alpha \Delta \tau_r. \quad (9)$$

$$N = \Delta f_{b1}' / \Delta f_{br} = (-2\alpha \Delta \tau_r) / (\alpha \Delta \tau_r) = -2. \quad (10)$$

式(10)より N の値と符号が判定でき、これより式(6)(ii)から絶対距離 L_a が求められる。

【0066】さて、実際に図1の構成でビート信号を検出した実測例を図8に示す。前述したように f_{b1} 、 f_{b2} 、 f_{br} の関係は式(4)の関係を示す形でそれぞれビート周波数スペクトラム94、95、96が出現していることがわかる。よって、本発明にあるような周回参照光を用いた原理により実際に測定レンジの拡大の効果が期待できる。

【0067】なお、図1の符号6a、6bは、それぞれ反射鏡である。符号6cは参照光学部である。参照光学部6cは、周回参照光学系68と、反射鏡6a、6bを含んでいる。

【0068】図9は、第1実施形態の変形例を示したものである。本変形例では、図1に示したファブリペロー型周回参照光学系68が、光源部61の直後に配置されている。図1と異なり、ビームスプリッター63aによりFM光62が参照光90と測定信号光91に分配される前に、周回参照光65が生成される。他の構成は、基本的に図1と同様であり、以下の通りである。

【0069】図9に示す第1実施形態の変形例は、所要の周期 $1/f_m$ で光の波長を可変にできる発光部60、61と、発光部60、61から出力された出力光62に基づいて、入力光62aを生成する入力光生成部(周回参照光学系)68と、入力光62aを分配して参照光69および測定光91を生成する光分配部(ビームスプリッター)63aと、測定光91が測定対象72に反射してなる測定反射光73と、参照光69とを合波して干渉光74を生成する光合波部(ビームスプリッター)63

(6)のいずれかに代入することで絶対距離 L_a を算出する。

$$N = \Delta f_{b1}' / \Delta f_{br}. \quad (7)$$

【0062】これらの関係式を用いて第1の実施形態で想定した具体例(原理図2から図7)について、 N とその符号を求めて絶対距離を求めてみる。まず図3で検出したビート周波数スペクトラム $f_{b1} 48$ に着目し、 N を求めるために前述したように周回参照光学系の基本光路長 L_r を ΔL_r (光路時間 $\Delta \tau_r$)だけ長くなる方向に変化させると(つまり図5の説明では $k=2$ に係る周回参照光45は $k'=2$ に係る周回参照光53に変化する)、得られるビート信号の周波数 $f_{b1} 48$ は $f'_{b1} 54$ へと変化する(図6)。

【0063】それぞれの関係を式(8)に示す。

【0065】式(8)と(9)を式(7)に代入、整理し N を求める。結果式(10)のようになる。

aと、干渉光74に基づいて、測定反射光73と参照光69の周波数差 f_{b1} を、測定光周波数差 f_{b1} として検出し、検出された測定光周波数差 f_{b1} に基づいて、測定対象72に関する測定量 L_a を求める検出部76とを備えている。なお、符号6dは、参照ミラーである。

【0070】入力光生成部68は、出力光62が、可変に設定可能な距離 L_r' 、 $L_r' + \Delta L_r'$ を N ($N \geq 2$)回往復または周回した結果としての光62aを、入力光62aとして生成可能である。反射鏡64、66間の間隔 L_r' を一往復する時間毎に定期的に出力される入力光62aのうち、周回回数 N が1のものを測定光91とする。参照光69については、周回回数 N (K)の数を問わないのは図2と同じである。

【0071】本変形例によっても、図1と同様に、測定精度を維持しつつダイナミックレンジの広い測定を行うことができる。

【0072】(第2の実施形態)図10を用いて第2の実施形態を示す。第2の実施形態と第1の実施形態との違いは周回参照光学系の構成であり、ビート信号検出から絶対距離を算出するまでの手順は第1の実施形態と同じである。

【0073】第2の実施形態の周回参照光学系はファイバループの形態で参照光を周回させており、周回参照光の基本光路長 L_r が長くなった時、第1の実施形態の空間型の光学系ではスペース大、アライメント難の問題が発生するが、本実施形態ではその部分がファイバループの構成を有しているため、たとえ基本光路長が長くなっても同じスペースで何重にもファイバを巻くことで、これらの問題は発生しないという利点がある。

【0074】第2の実施形態は、周回参照光学系115以外の部分の構成・作用は第1の実施形態とほぼ同じであるため、重複を避ける意味でここでは周回参照光学系115に注目し説明する。

【0075】図10の第2の実施形態の周回参照光学系115について説明する。周回参照光学系115の構成は2×2光ファイバカプラ（もしくはX分岐光導波路）109、そして周回するための光ファイバ116、そのファイバ中に挿入される格好でN次の判定のための光路遅延・選択器111（例えば、移動ステージ、光ファイバ、導波路、複屈折結晶等が挙げられるが、その他で光路を最低2種類変化もしくは選択できる目的であるならばそれも含まれる）で構成されている。

【0076】まず参照光108が最終的に周回参照光112として出力されるために周回参照光学系115に導入される。参照光108は2×2光ファイバカプラ109（分岐比 $x:1-x$ 、 x は任意）の入力端ポート①に入力し2×2光ファイバカプラ109の分岐比に従い、一部はそのままポート③から出力光112として、また残りはポート④から周回光110として出力される。

【0077】周回光110は光路遅延・選択器111を経て再び2×2光ファイバカプラ109の入力端ポート②に入力し、一部はそのまま出力端ポート③から出力光112として、また残りは再び出力端ポート④から2周目の周回光110として出力される。そのあとの周回光110の振る舞いは前述の繰り返しである。これらの繰り返しにより周回参照光学系115は、常に2×2光ファイバカプラ109の出力端ポート③から周回参照光112を出力することができる。

【0078】本実施形態における絶対測長に必要なN次判定方法は第1の実施形態と同じであるために、ここでは重複をさけるために省略する。本実施形態は周回参照光学系をファイバを用い、それをループ状に構成することでその基本光路長が長くなってもそのループ部分を何重にも巻き付けることで小型化に対応できる点である。これより本実施形態は第1の実施形態の測長レンジの拡大と同時にその光学系の小型化にも効果がある。

【0079】なお、図10において、符号100は、1×2ファイバ方向性結合器（カプラ）であり、101は測定光であり、102はコリメートレンズであり、103は測定光であり、104はビームスプリッタであり、105は測定対象であり、106は測定反射光であり、107は結合レンズであり、113は干渉用1×2光ファイバカプラであり、114は干渉光である。

【0080】（第3の実施形態）図11の（a）、（b）を用いて第3の実施形態を説明する。本実施形態と他の実施形態（第1および第2の実施形態）の違いは、図11（a）および（b）のそれぞれの周回光路中に光増幅器120、123が挿入されている点である。これにより第1、第2の実施形態のように透過率、分岐

比による周回参照光のその光学構成上避けられない強度減衰は、本実施形態により常に保証され、これらの制約条件をなくすことで、周回参照光の周回数を飛躍的に拡大、つまり更なる測長レンジの拡大が可能となる。

【0081】図11（a）は第1の実施形態の周回参照光学系を光ファイバ83に置き換え光増幅器120を付加した場合（空間光学系のままでも半導体型光増幅器を挿入することで同じ効果が期待できるがファイバにすることで更にこれらの構成が容易で小型化になる）である。この作用について説明する。

【0082】参照光80は高反射膜端面82と85間を多重反射することで周回光121が発生、それが光増幅器120により増幅され、光路遅延・選択器84を経て端面85から増幅した周回参照光122として出力される。また、同図（b）は第2の実施形態の光学構成に光増幅器123を付加した場合である。その構成において周回参照光が得られるまでの作用は第2の実施形態と同じであるためここではその説明を省略する。

【0083】本実施形態の説明の中で、参照光が周回する動作やそのN次数を判定し、絶対距離を算出するまでの過程は、第1および第2の実施形態で前述したのと同じであるためその説明は省略する。本実施形態より第1および第2の実施形態の構成では避けることができない透過率、分岐比による周回参照光のその光学構成上避けられない強度減衰による周回数の制限による測長レンジの制約は、各実施形態の周回光路長に光増幅器を挿入することで常に保証され、これらの制約条件をなくすことで、周回参照光の周回数を飛躍的に拡大、つまり更なる測長レンジの拡大という効果をもたらす。

【0084】図10（a）において、符号80は参照光であり、図1の符号90に相当する。図10（b）において、符号124は周回光であり、図10の符号124に相当し、符号125は周回参照光であり、図10の符号112に相当する。

【0085】（第4の実施形態）図12（a）、（b）を用いて第4の実施形態を説明する。本実施形態が他の第1、第2および第3の実施形態と異なる点は、N次の判定に必要な周回光路長を可変にする機構部分である。第1、第2および第3の実施形態のいずれの場合もこの部分は、物理的な光路長変化のために移動ステージや長さが異なる光路を選択できる仕組みになっている。これはいずれも機械的機構に依存するため、N次判定に時間がかかり、同時に装置の大型化、周回損失を招き測長レンジを制限する要因となる。

【0086】そこで本実施形態では、これらN次の判定に必要な周回光路長の可変機構を光の複屈折効果を利用し、光の偏光方向を変えることで光路長を変えるのと同様な作用をする特長を有しており、周回光路中に別途、光路遅延・選択器を挿入する必要がなくなり、結果、測長レンジの拡大を妨げる原因を減らすことができ測長レ

レンジの拡大に、また、装置構成が簡素となり低コストに、また、N次判定時間の短縮に寄与する。

【0087】本実施形態ではその光路長を変化させる時の機構に他の実施形態と大きな違いがあり、光路長を変化させた後のN次判定の方法については他の実施形態と全く同じである。そのため本実施形態特有の事柄を除いて、N次判定による絶対測長の方法といった説明は、ここでは重複するため説明を省略する。

【0088】本実施形態(a)の構成および作用について説明する。ある直線偏光をもつ参照光80が $\lambda/2$ 板131を通り、複屈折光ファイバ(偏波面保存ファイバ)130と両端面が高反射率ミラー膜82、85とで形成されているファブリペロー干渉系に入力される。また、ここで参照光80が円偏光であっても $\lambda/2$ 板131を偏向子に置き換えることでもよい。

【0089】するとこのファイバ型ファブリペロー干渉系を往復反射することで周回参照光132が発生し、ファイバを一往復することに各周回ごとの参照光がファイバ端85から出力される。その出力光はその偏光状態に合わせて $\lambda/2$ 板(または偏光子)133を通ることで入力参照光80と同じ偏光方向の周回参照光134が出力される。この時N次を判定する前の偏光状態(p偏光とする)における一周回光路長は $L_{r,p} = n_p \cdot L_r$ 。

($L_{r,p}$: p偏光からみたファイバ物理長、 n_p : p偏光からみたファイバ屈折率)である。

【0090】ビート周波数を検出しN次判定する際は入出力側のそれぞれの $\lambda/2$ 板(または偏光子)131、133を回転させ、その偏光方向を90度(直交)変化させ、偏光状態をs偏光とする。すると、複屈折光ファイバ130中の複屈折効果による偏光方向の違いから生じる複屈折率差から、あたかもファイバの物理長を変えたのと等価の作用を起こすことができる。

【0091】つまり、 $\Delta L_r = L_{r,p} - L_{r,s} = (n_p - n_s) \cdot L_r$ 。($L_{r,s}$: s偏光からみたファイバ物理長、 n_s : s偏光からみたファイバ屈折率)で、具体的にはその屈折率差($n_p - n_s$)は $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 程度であり、それでも、もしファイバ長1mならばその光路差は1~10mmとなる。この程度の光路差が発生できれば、十分にN次の判定をおこなうことができ、これより絶対距離を算出することができる。

【0092】同様に同図(b)の構成と作用について説明する。構成は2×2偏波面保存ファイバコア143を中心にその入出力端には $\lambda/2$ 板(または偏光子)140、145から構成されている。参照光108、141がその周回参照光学系に入力、最終的に周回参照光144、146になるまでの過程は、第2の実施形態(図10)で説明したのと同じであるため重複を避けるためにここでの説明を省略する。また、N次判定に必要な偏波面操作によって光路差を得る手法も、すでに前述した図12(a)の説明と同じであるためにここでの説明を

省略する。なお、符号142は周回光である。

【0093】図12(b)は周回参照光の周回スタイルが異なるが基本的にはその効果は前述したように、周回光路中に別途、光路遅延・選択器を挿入する必要がなくなり、結果、測長レンジの拡大を妨げる原因を減らすことができ測長レンジの拡大に、また、装置構成が簡素となり低コストと小型化に、また、N次判定時間の短縮という効果がある。

【0094】本実施形態によれば、光源のコヒーレンスが低くても長距離まで計測範囲を拡大でき、同時にその計測精度も維持できることから比較的安価な光源においても高精度長距離測長システムを低コストで供給できる。

【0095】本実施形態によれば、相対的な変位量だけではなく、粗計測のN次数を求めることができ、これらを組み合わせることで同時に絶対距離をも算出することができる。

【0096】

【発明の効果】本発明の光周波数領域反射測定装置によれば、任意の光源特有のコヒーレンスに制限されことなく測定範囲の拡大ができ、同時にこれまでの測定範囲の拡大にともなう測定精度の劣化を解消し、測定範囲が拡大しても測定精度が悪くならない。

【図面の簡単な説明】

【図1】図1は、本発明の光周波数領域反射測定装置の第1の実施形態の構成を示す図である。

【図2】図2は、第1実施形態において、周回参照光によるビート信号の検出原理に関し、光周波数掃引の時間変化を示す図である。

【図3】図3は、第1実施形態において、周回参照光によるビート信号の検出原理に関し、ビート周波数スペクトラムを示す図である。

【図4】図4は、第1実施形態において、周回参照光によるビート信号の検出原理に関し、測定距離Lに伴うビート周波数値の軌跡を示す図である。

【図5】図5は、第1実施形態において、周回数Nの判定方法に関し、周回光路長変化に伴う光周波数掃引の時間変化を示す図である。

【図6】図6は、第1実施形態において、周回数Nの判定方法に関し、周回光路長変化に伴うビート周波数スペクトラムの変化を示す図である。

【図7】図7は、第1実施形態において、周回数Nの判定方法に関し、周回光路差 ΔL_r 変化によるビート周波数値の軌跡を示す図である。

【図8】図8は、第1実施形態において、周回参照光によるビート周波数スペクトラムの実測例を示す図である。

【図9】図9は、第1の実施形態の変形例の構成を示す図である。

【図10】図10は、第2の実施形態の構成を示す図で

ある。

【図11】図11は、第3実施形態の要部構成を示し、(a)は第1実施形態に適用した図、(b)は第2実施形態に適用した図である。

【図12】図12は、第4実施形態の要部構成を示し、(a)は第1実施形態に適用した図、(b)は第2実施形態に適用した図である。

【図13】図13は、従来一般の光周波数領域反射測定装置の構成を示す図である。

【図14】図14は、図13の装置におけるビート信号検出原理に関し、(a)は光FM波変化を示し(b)はビート周波数変化を示し、(c)はビート信号強度波形を示す図である。

【図15】図15は、図13の装置におけるビート信号検出原理に関し、ビート周波数成分を示す図である。

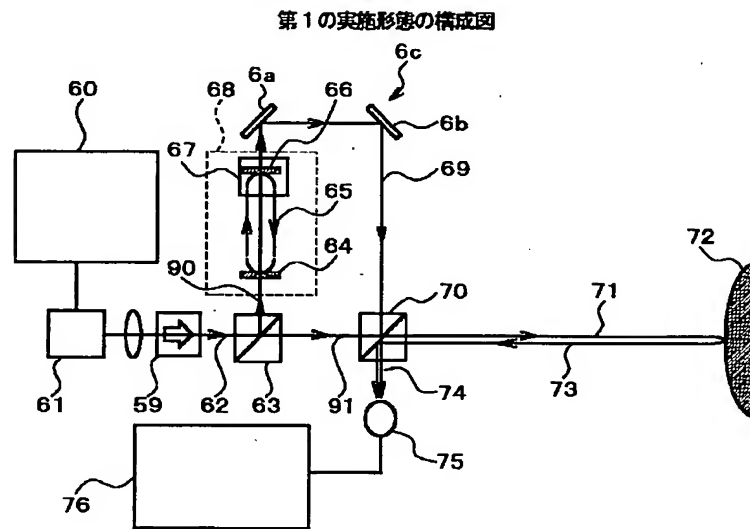
【符号の説明】

- 1 発振器
- 2 半導体レーザ
- 3 光FM出力
- 4 ビームスプリッタ
- 5 参照光
- 6 参照ミラー
- 6a 反射鏡
- 6b 反射鏡
- 6c 参照光学部
- 6d 参照ミラー
- 7 物体光
- 8 測定対象
- 9 干渉光
- 10 光検出器
- 11 A/D変換器
- 12 演算装置
- 40 隣り合う周回参照光同士の干渉ビート周波数 f_{br}
- 41 $k=2$ 周目の周回参照光と測定反射光とのビート周波数 f_{b1}
- 42 $k=2$ 周目の周回参照光と測定反射光とのビート周波数 f_{b2}
- 43 測定反射光
- 44 $k=N$ 周目の周回参照光
- 45 $k=2$ 周目の周回参照光
- 46 $k=3$ 周目の周回参照光
- 47 隣り合う周回参照光同士の干渉ビート周波数スペクトラム
- 48 $k=2$ 周目の周回参照光と測定反射光とのビート周波数スペクトラム
- 49 $k=3$ 周目の周回参照光と測定反射光とのビート周波数スペクトラム
- 50 $0 \leq f_{b1} \leq f_{br}/2$ 範囲のビート周波数 f_{b1} と絶対距離との関係

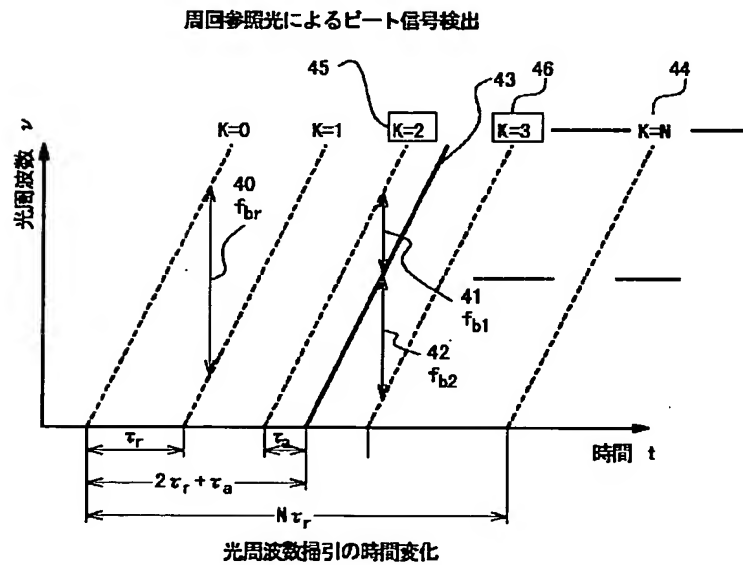
- 53 周回光路差変化後の2周目の周回参照光
- 54 周回光路差変化後の2周目参照光と測定信号光とのビート周波数スペクトラム
- 59 光アイソレータ
- 60 光周波数変調制御部
- 61 光源
- 62 光FM出力
- 63 ビームスプリッタ
- 63a ビームスプリッタ
- 64 反射鏡1
- 65 周回光
- 66 反射鏡2
- 67 移動ステージ
- 68 ファブリペロー型周回参照光学系
- 69 周回参照光
- 70 ビームスプリッタ
- 71 測定信号光
- 72 測定対象
- 73 測定反射光
- 74 干渉光
- 75 受光器
- 76 信号処理部
- 80 参照光
- 82 入力側高反射膜端面
- 83 光ファイバ
- 84 光路遅延・選択器
- 85 出力側高反射膜端面
- 94 実測例における f_{b1} のビート周波数スペクトラム
- 95 実測例における f_{b2} のビート周波数スペクトラム
- 96 実測例における f_{br} のビート周波数スペクトラム
- 100 1×2 ファイバ方向性結合器(カブラ)
- 101 測定光出力
- 102 コリメートレンズ
- 103 測定光
- 104 ビームスプリッタ
- 105 測定対象
- 106 測定反射光
- 107 結合レンズ
- 108 参照光出力
- 109 2×2 光ファイバカブラ
- 110 周回光
- 111 光路遅延・選択器
- 112 周回参照光
- 113 干渉用 1×2 光ファイバカブラ
- 114 干渉光
- 115 周回参照光学系
- 116 光ファイバ

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| 116 a 光ファイバの入力部 | 132 ファイバファブリペロー干渉系内の周回光 |
| 116 b 光ファイバの出力部 | 133 出力側の偏光素子 |
| 120 光増幅器 | 134 周回参照光 |
| 121 ファイバファブリペロー干渉系内の周回光 | 140 入力側の偏光素子 |
| 122 周回参照光 | 141 参照光 |
| 123 光増幅器 | 142 周回光 |
| 124 周回光 | 143 2×2偏波面保存光ファイバカプラ |
| 125 周回参照光 | 144 周回参照光出力 |
| 130 偏波面保存ファイバ | 145 出力側の偏光素子 |
| 131 入力側の偏光素子 | 146 偏波面が調整された周回参照光 |

【図1】

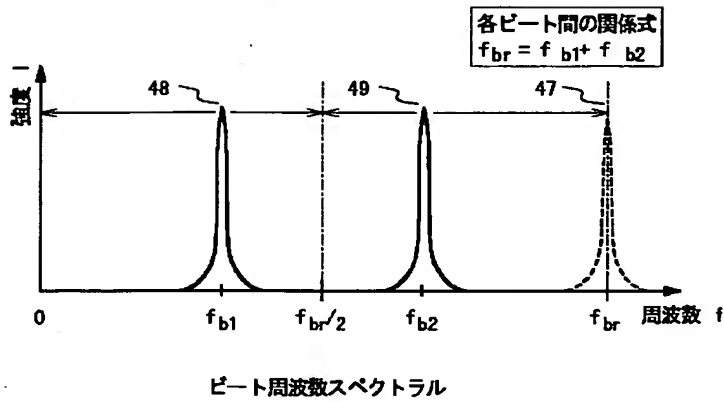


【図2】



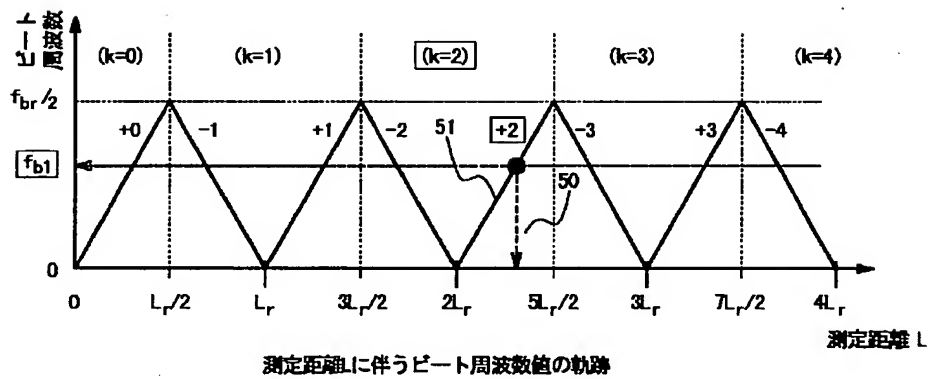
【図3】

周回参照光によるビート信号検出



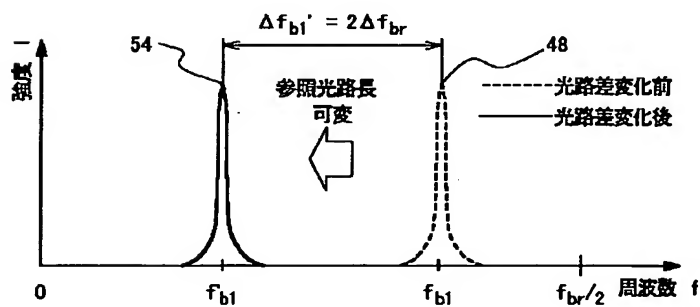
【図4】

周回参照光によるビート信号検出

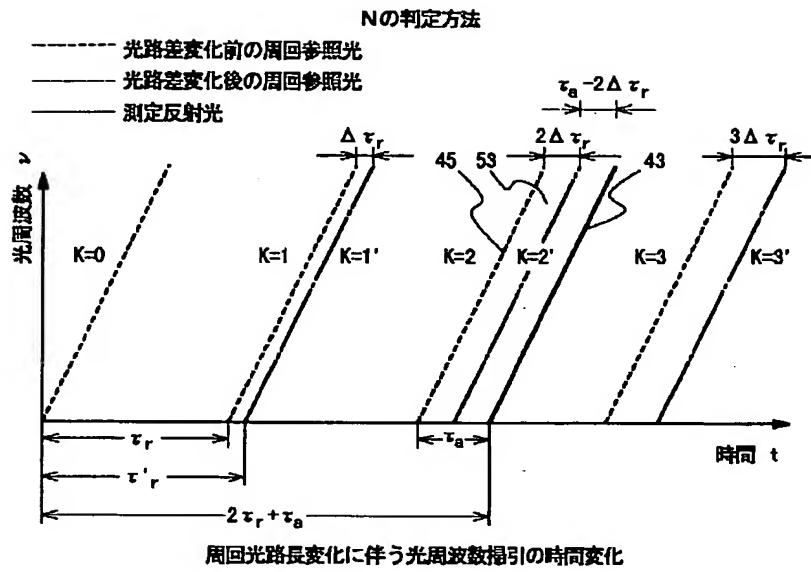


【図6】

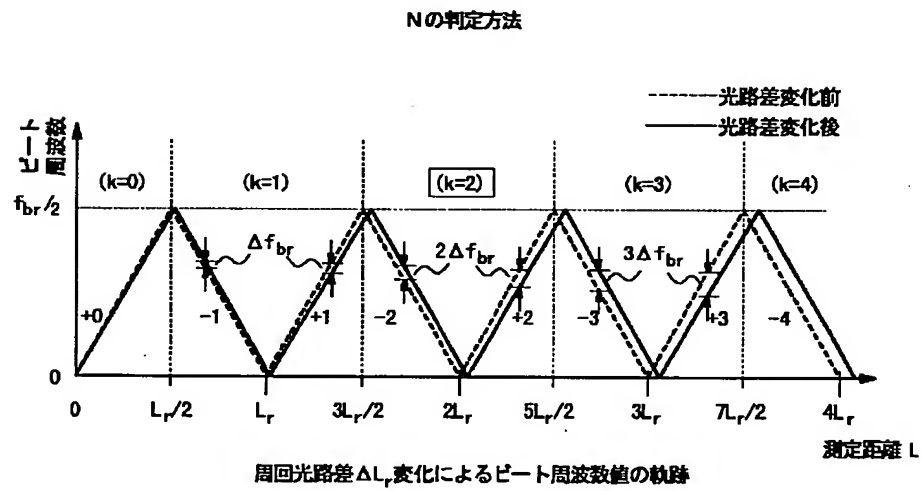
Nの判定方法



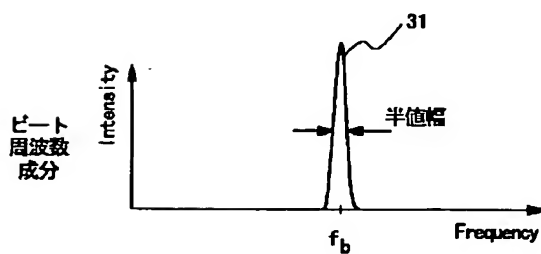
【図5】



【図7】

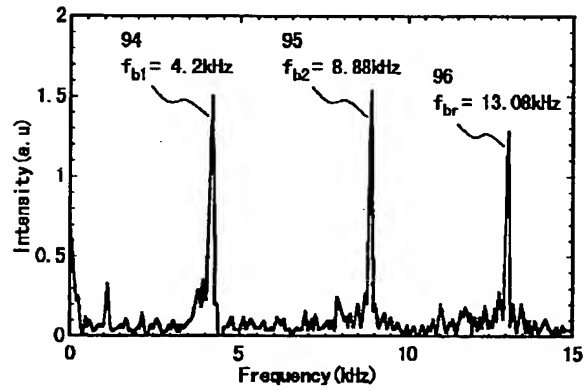


【図15】



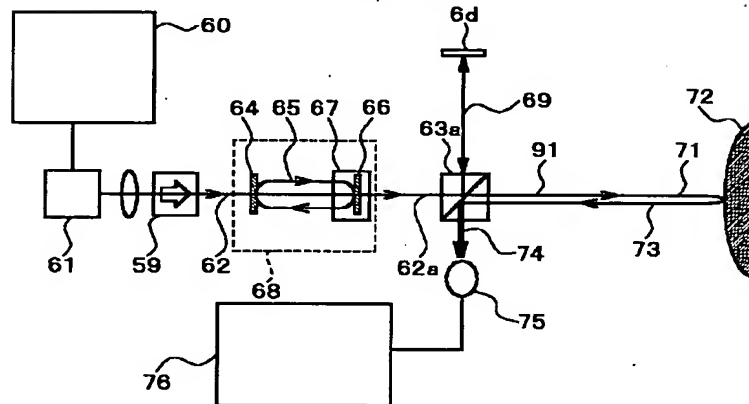
【図8】

実測例

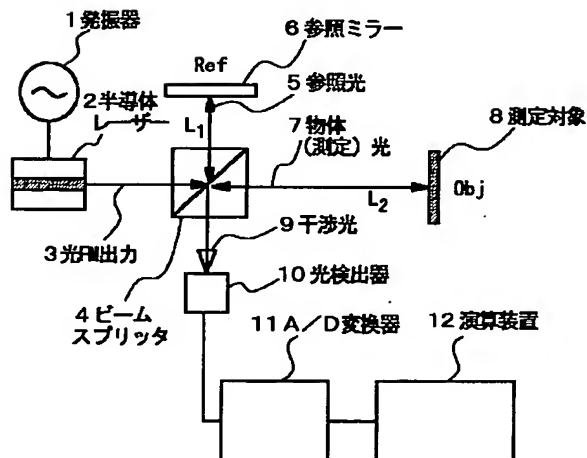


【図9】

第1の実施形態の変形例の構成図

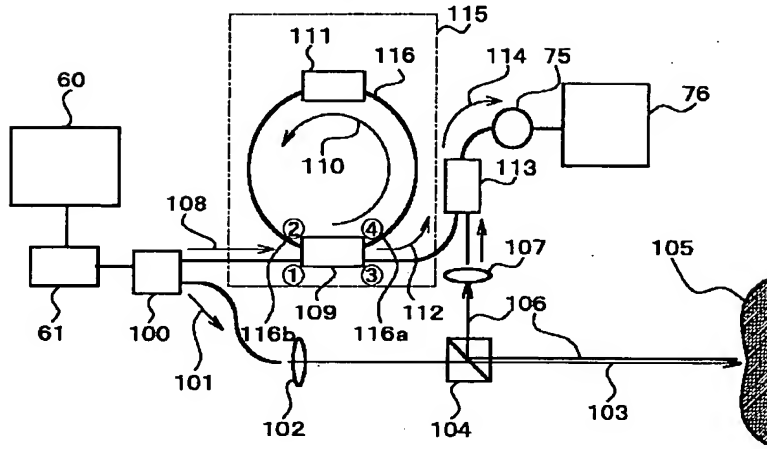


【図13】



【図10】

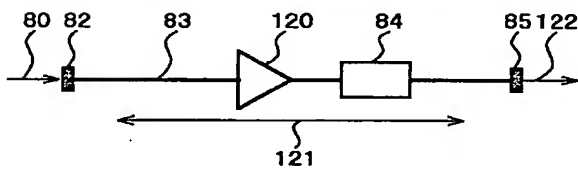
第2の実施形態の構成図



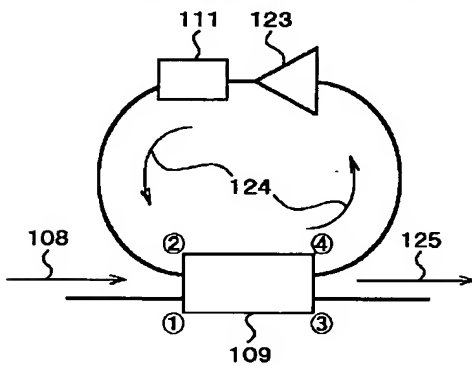
【図11】

第3の実施形態の構成図

(a) 周回参照光学系68
(図1 第1の実施形態の点線枠) の場合



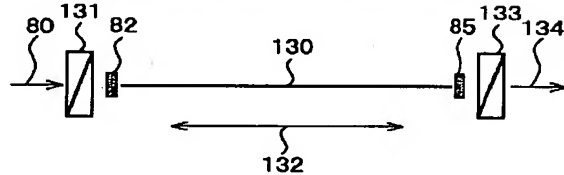
(b) 周回参照光学系115
(図10 第2の実施形態の点線枠) の場合



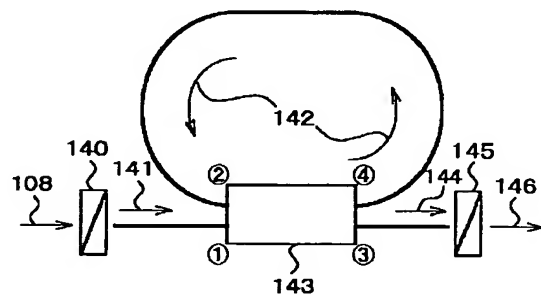
【図12】

第4の実施形態の構成図

(a) 周回参照光学系68
(図1 第1の実施形態の点線枠) の場合



(b) 周回参照光学系115
(図10 第2の実施形態の点線枠) の場合



【図14】

